

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

環氧樹脂補強火害後混凝土之參數研究 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 98-2221-E-009-165-
執行期間：98年08月01日至99年07月31日
執行單位：國立交通大學土木工程學系(所)

計畫主持人：鄭復平

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 99 年 11 月 15 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

環氧樹脂補強火害後混凝土之參數研究

計畫編號：NSC 98-2221-E-009-165

執行期限：98年8月1日至99年7月31日

主持人：鄭復平 執行機構及單位名稱：國立交通大學

一、中文摘要

鋼筋混凝土建物火災損壞範圍集中在表層，因此混凝土高溫火害後補強相當重要，在不同冷卻方式不同養護條件下，試以注入環氧樹脂進入混凝土中進行補強，並探討其殘餘強度及補強效果。

本研究探討以普通混凝土與高強度混凝土兩種材料，在加溫時承受兩種目標溫度（600°C、800°C），冷卻時以不同冷卻方式（急速冷卻及自然冷卻），兩種再養護方法（滯水再養護及空氣再養護）與不同再養護齡期（7、28、60、90天），分別以環氧樹脂補強後成效進行比較。

結果發現，目標溫度600°C的試體補強效果較800°C的試體佳，可讓試體達到原強度的七成以上，但目標溫度800°C的試體補強效果就不盡理想，而且高溫火害後再養護時間越長，由於混凝土之自癒性，使環氧樹脂難以以真空方試灌入裂縫，補強成效因而折減。

關鍵字：混凝土、殘餘強度、環氧樹脂、補強、高溫損害

Abstract

The strength of reinforce concrete buildings decreased after exposed to high temperatures. Most damages of concrete are on the surface only. It is important to repair the cracks in concrete. The effect different cooling methods and curing conditions were explored. The residual strength and repair effect were studied after repaired by epoxy.

This study is devoted to investigate the effect of epoxy on strength increase

of concrete after exposed to fire. The major experimental parameters include high temperatures (600 °C , 800 °C), cooling methods (natural cooling, rapid cooling), re-curing methods (air curing, water curing), re-curing times (7, 28, 60, 90 days), and the strength of concretes (280 kgf/cm², 560 kgf/cm²).

Results show that the epoxy restored the compressive strength of concrete after exposed to 600 °C temperature can be greater than 70%. But concrete can recover only 10% of its strength for specimens after exposed 800°C temperature.

Keywords: concrete, residual strength, epoxy, repair, high temperature damage

二、緣由與目的

緣由

隨著時代進步，人口的過度集中造成可以利用的土地越來越少，高層建物成為市場的主流，由於混凝土建材相對便宜，除超高樓層使用鋼結構材料外，絕大多數高層樓房都是使用鋼筋混凝土為建材。由於混凝土為優良隔熱材料，可以有效的隔開火源，所以一般來說火災發生時僅有部分樓層受損，且火災損壞範圍集中在表層，以往在災後的處理方式只能消極的將整體建物拆除，但是現今高樓林立，拆除整體建物造成的財物損失絕非過去所能比擬。火害房屋建築物結構的破壞維修，在土木將會是一大課題，而若能研發有效且經濟的火害補

強方式將可節省大量的社會成本。

環氧樹脂為熱固型樹脂，當主劑與硬化劑依定比例混合後，交鏈硬化成強力接著劑，其具有調配容易、塑形容易、不透水等特性，現今在土木方面已用於構造物接著、修補、防水、防蝕等用途，本研究將嘗試以負壓方式將環氧樹脂注入混凝土內部提升混凝土之強度，根據不同情形進行火害後混凝土強度之增強作業，比較注入環氧樹脂前後混凝土強度差異。

目的

混凝土受火害後除其材料物理性質變化外，也造成其內部產生許多裂縫，本試驗嘗試以負壓方式灌入環氧樹脂以修補試體裂縫，增強其強度，並針對產生裂縫的諸多變數進行探討，實務上，火災發生時，現場消防隊員通常以強力水柱急速滅火，造成結構物溫度急遽變化，與一般火害實驗自然置於空氣中之降溫條件截然不同。再者，根據以往研究指出，火害後給予混凝土濕治再養護，將可回復部分強度。故以上述二變數為基礎，本研究將探討以急速冷卻及自然冷卻兩種冷卻方式，滯水再養護及空氣再養護兩種再養護方法所帶來的混凝土強度差異，分別以環氧樹脂補強後成效進行比較，本研究範圍如下述幾種：

1. 比較混凝土受到不同溫度下以環氧樹脂增強強度回復變化。
2. 比較混凝土在不同降溫方式下以環氧樹脂增強強度回復變化。
3. 比較滯水再養護及空氣再養護之混凝土以環氧樹脂增強強度回復變

化。

4. 比較不同再養護時間下以環氧樹脂增強強度回復變化。
5. 比較不同強度混凝土以環氧樹脂增強強度回復變化。

三、試驗方法

1. 以符合規範所制定之強度、坍度、流度之新拌混凝土製作直徑 10 公分高, 20 公分直徑之圓柱試體，放置水中養護至養護齡期完成後，取出試體以烘箱維持 $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ 持續烘乾一週，以免試體於高溫爐中加熱時爆裂。
2. 本試驗試體普通強度混凝土設計強度為 280 kgf/cm^2 、高強度混凝土設計強度為 560 kgf/cm^2 ，實驗溫度將高溫爐（如圖 1.）加溫至爐溫達 600°C 、 800°C 兩種溫度，達到目標溫度後分為自然降溫及急速降溫兩種降溫方式，降溫一日後又分為空氣再養護、持續泡水再養護兩種再養護方式，再養護齡期分為 7、28、60、90 天四種齡期。
3. 再養護完成之後以環氧樹脂灌入儀（如圖 2.）將環氧樹脂以負壓灌入毀損的試體中，首先將各管線開關關閉，再將環氧樹脂放入環氧樹脂放置槽。待補強混凝土試體放入真空槽，隨後關閉環氧樹脂放置槽及真空槽之頂蓋，接著開啟真空幫浦至真空槽管線單向開關，啟動真空幫浦，將真空槽空氣抽出形成負壓，待真空壓力表顯示真空槽內壓力達到負壓 0.5 kg/cm^2 後關閉馬達，並關閉真空槽至真空幫浦之間的單向閥開關，接著開啟環氧樹脂放置槽及真空槽連接管開關閥利

用負壓抽取環氧樹脂放置槽內之環氧樹脂至真空槽中並吸入試體中，直至負壓消失後，打開真空槽頂蓋取出試體。試體取出後，分別打開環氧樹脂放置槽、真空槽以及真空槽與真空馬達之間管線下方之清潔單向開關閥，排除剩餘環氧樹脂，待環氧樹脂排除後，將各管線開關閥關閉，再將清洗藥劑放入環氧樹脂放置槽，同樣以上述負壓步驟進行三次，將環氧樹脂灌入儀各管線清洗以保持暢通、避免堵塞，補強作業 7 天後進行抗壓試驗，比較補強前後強度之改變。

四、試驗結果

本試驗當中，混凝土經不同高溫火害之後，以不同方式再養護，再以環氧樹脂補強試體，試體之殘餘強度因其實驗條件而有所不同，以下分為四大主題探討其實驗結果：

1. 高強度混凝土受溫 800°C

(1) 急速冷卻滯水再養護

高強度混凝土在受溫 800°C 後，急速冷卻並給與滯水再養護再以環氧樹脂補強殘餘強度（如圖 3.），虛線部分為本試驗對照組，分別代表高強度混凝土受高溫 800°C 後，急速冷卻未再養護也未補強之殘餘強度為原始試體強度的 10.8%，以及高強度混凝土受高溫 800°C 後，急速冷卻後滯水再養護 90 天但未補強之殘餘強度為原始試體強度的 15.4%。而本組試驗對照組有二，其一為高強度混凝土受溫 800°C 後，急速冷卻並且滯水再養 28 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 25.4%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 14.6%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 10%；另一對照組為高強

度混凝土受溫 800°C 後，急速冷卻並且滯水再養 90 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 23.1%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 12.3%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 7.7%。

(2) 自然冷卻滯水再養護

高強度混凝土在受溫 800°C 後，自然冷卻並給與滯水再養護再以環氧樹脂補強殘餘強度（如圖 4.），本試驗對照組如下，高強度混凝土受高溫 800°C 後，自然冷卻未再養護也未補強之殘餘強度為原始試體強度的 16.9%；高強度混凝土受高溫 800°C 後，自然冷卻後滯水再養護 90 天但未補強之殘餘強度為原始試體強度的 18.4%。而本組試驗對照組如下，高強度混凝土受溫 800°C 後，自然冷卻並且滯水再養 28 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 26.9%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 10%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 8.4%；高強度混凝土受溫 800°C 後，自然冷卻並且滯水再養 60 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 32.6%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 15.7%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 14.2%；另一對照組為高強度混凝土受溫 800°C 後，自然冷卻並且滯水再養 90 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 25.5%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 8.6%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 7.1%。

整體而言高強度混凝土受高溫 800°C 後即使以環氧樹脂補強，其殘餘強度僅達原強度約三成左右，由環氧樹脂增強強度大約為原強度的一成。

2. 高強度混凝土受溫 600°C

(1) 急速冷卻滯水再養護

高強度混凝土在受溫 600°C 後，急速冷卻並給與滯水再養護再以環氧樹脂補強殘餘強度（如圖 5.），高強度混凝土受高溫 600°C 後，急速冷卻未再養護也未補強之殘餘強度為原始試體強度的 31.7%；高強度混凝土受高溫 600°C 後，急速冷卻後滯水再養護 90 天但未補強之殘餘強度為原始試體強度的 50.7%。本組試驗對照組有二，其一為高強度混凝土受溫 600°C 後，急速冷卻並且滯水再養 28 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 96.1%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 64.4%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 45.4%；另一對照組為高強度混凝土受溫 600°C 後，急速冷卻並且滯水再養 90 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 52.6%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 20.9%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 1.9%。

(2) 自然冷卻滯水再養護

高強度混凝土在受溫 600°C 後，自然冷卻並給與滯水再養護再以環氧樹脂補強殘餘強度（如圖 6.），本試驗對照組如下，高強度混凝土受高溫 600°C 後，自然冷卻未再養護也未補強之殘餘強度為原始試體強度的 34%；高強度混凝土受高溫 600°C 後，自然冷卻後滯水再養護 90 天但未補強之殘餘強度為原始試體強度的 56%。而本組試驗對照組如下，高強度混凝土受溫 600°C 後，自然冷卻並且滯水再養 28 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 67.5%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 33.5%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 11.5%；高強度混凝土受溫 600°C 後，自然冷卻並且滯

水再養 60 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 67.3%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 33.3%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 11.3%；另一對照組為高強度混凝土受溫 600°C 後，自然冷卻並且滯水再養 90 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 73%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 39%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 17%。

由以上結果發現，高強度混凝土受高溫 600°C 後以環氧樹脂補強，其殘餘強度皆達原強度五成以上，補強效果相當不錯，由環氧樹脂增強強度為原強度一至四成，且隨著再養護天數增加，補強效果有遞減情況發生。

3. 普通強度混凝土受溫 800°C

(1) 急速冷卻滯水再養護

普通強度混凝土在受溫 800°C 後，急速冷卻並給與滯水再養護再以環氧樹脂補強殘餘強度（如圖 7.），本試驗對照組，分別為普通強度混凝土受高溫 800°C 後，急速冷卻未再養護也未補強之殘餘強度為原始試體強度的 18.4%，以及普通強度混凝土受高溫 800°C 後，急速冷卻後滯水再養護 90 天但未補強之殘餘強度為原始試體強度的 20.8%。而本組試驗對照組如下，普通強度混凝土受溫 800°C 後，急速冷卻並且滯水再養 7 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 28.9%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 10.5%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 8.1%；普通強度混凝土受溫 800°C 後，急速冷卻並且滯水再養 28 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 23.5%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 5.1%，若與經 90 天滯水養護的試體相

較，可提升原強度的 2.7%；另一對照組為普通強度混凝土受溫 800°C 後，急速冷卻並且滯水再養 90 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 25.5%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 7.1%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 4.7%。

(2) 自然冷卻滯水再養護

高強度混凝土在受溫 800°C 後，自然冷卻並給與滯水再養護再以環氧樹脂補強殘餘強度（如圖 8.），本試驗對照組如下，普通強度混凝土受高溫 800°C 後，自然冷卻未再養護也未補強之殘餘強度為原始試體強度的 34.8%；普通強度混凝土受高溫 800°C 後，自然冷卻後滯水再養護 90 天但未補強之殘餘強度為原始試體強度的 34.3%。而本組試驗對照組如下，普通強度混凝土受溫 800°C 後，自然冷卻並且滯水再養 7 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 46.8%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 12%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 12.5%；普通強度混凝土受溫 800°C 後，自然冷卻並且滯水再養 28 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 41.6%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 6.8%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 7.3%；普通強度混凝土受溫 800°C 後，自然冷卻並且滯水再養 60 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 40%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 5.2%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 5.7%；另一對照組為普通強度混凝土受溫 800°C 後，自然冷卻並且滯水再養 90 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 32.8%，本數據殘餘強度甚至低於對照組數據，視為實驗誤差所致。

(3) 自然冷卻空氣再養護

普通強度混凝土在受溫 800°C 後，自然冷卻並給與空氣再養護再以環氧樹脂補強殘餘強度（如圖 9.），本試驗對照組如下，普通強度混凝土受高溫 800°C 後，自然冷卻未再養護也未補強之殘餘強度為原始試體強度的 34.8%。而本組試驗對照組如下，普通強度混凝土受溫 800°C 後，自然冷卻並且空氣再養 7 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 46.8%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 12%；普通強度混凝土受溫 800°C 後，自然冷卻並且空氣再養 28 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 44.9%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 10.1%；普通強度混凝土受溫 800°C 後，自然冷卻並且空氣再養 60 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 41.2%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 6.4%；普通強度混凝土受溫 800°C 後，自然冷卻並且空氣再養 90 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 41.7%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 6.9%。

整體而言普通強度混凝土受高溫 800°C 後即使以環氧樹脂補強，其殘餘強度僅達原強度約四成左右，其中以環氧樹脂增加試體強度皆於一成上下，且隨著再養護天數增加，補強效果有遞減情況發生。

4. 普通強度混凝土受溫 600°C

(1) 急速冷卻滯水再養護

普通強度混凝土在受溫 600°C 後，急速冷卻並給與滯水再養護再以環氧樹脂補強殘餘強度（如圖 10.），普通強度混凝土受高溫 600°C 後，急速冷卻未再養護也未補強之殘餘強度為原始試體強度的 45.9%；普通強度混凝土受高溫

600°C 後，急速冷卻後滯水再養護 90 天但未補強之殘餘強度為原始試體強度的 49.3%。本組試驗對照組如下，普通強度混凝土受溫 600°C 後，急速冷卻並且滯水再養 7 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 75%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 29.1%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 25.7%；普通強度混凝土受溫 600°C 後，急速冷卻並且滯水再養 28 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 63.7%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 17.8%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 14.4%；普通強度混凝土受溫 600°C 後，急速冷卻並且滯水再養 90 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 49.6%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 3.7%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，僅提升原強度的 0.3%。

(2) 自然冷卻滯水再養護

普通強度混凝土在受溫 600°C 後，自然冷卻並給與滯水再養護再以環氧樹脂補強殘餘強度（如圖 11.），本試驗對照組如下，普通強度混凝土受高溫 600°C 後，自然冷卻未再養護也未補強之殘餘強度為原始試體強度的 54.2%；普通強度混凝土受高溫 600°C 後，自然冷卻後滯水再養護 90 天但未補強之殘餘強度為原始試體強度的 58.3%。而本組試驗對照組如下，普通強度混凝土受溫 600°C 後，自然冷卻並且滯水再養 7 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 80.3%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 26.1%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 22%；普通強度混凝土受溫 600°C 後，自然冷卻並且滯水再養 28 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的

79.6%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 25.4%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 21.3%；普通強度混凝土受溫 600°C 後，自然冷卻並且滯水再養 60 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 67.4%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 13.2%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 9.1%；普通強度混凝土受溫 600°C 後，自然冷卻並且滯水再養 90 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 77.4%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 23.2%，若與經 90 天滯水養護的試體相較，可提升原強度的 19.1%。

(3) 自然冷卻空氣再養護

普通強度混凝土在受溫 600°C 後，自然冷卻並給與空氣再養護再以環氧樹脂補強殘餘強度（如圖 12.），本試驗對照組如下，普通強度混凝土受高溫 600°C 後，自然冷卻未再養護也未補強之殘餘強度為原始試體強度的 54.2%。而本組試驗對照組如下，普通強度混凝土受溫 600°C 後，自然冷卻並且空氣再養 28 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 65%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 10.8%；普通強度混凝土受溫 600°C 後，自然冷卻並且空氣再養 60 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度為原始試體強度的 69%，與未經養護且未經補強的試體相較，可提升原強度的 14.8%；普通強度混凝土受溫 800°C 後，自然冷卻並且空氣再養 90 天護再以環氧樹脂補強，其殘餘強度低於對照組數據視為試驗誤差。

由以上結果發現，普通強度混凝土受高溫 600°C 後以環氧樹脂補強，其殘餘強度皆達原強度六成以上，補強效果相當不錯，其中由環氧樹脂所提升的強度為原強度的一至三成，且隨著再

養護天數增加，補強效果有遞減情況發生。

經由以上分析可得知環氧樹脂在 800°C 火害混凝土之補強效果有限，補強後仍不能達其適用性，探究原因應是 800°C 火害之後，混凝土開裂過大，環氧樹脂無法有效接合混凝土碎塊，導致其強度提升不如預期；相較之下混凝土受高溫 600°C 後以環氧樹脂補強的補強成效相當不錯，值得探討與發展。

本研究當中大部分數據顯示隨著再養護時間的增加，以環氧樹脂補強後試體殘餘強度逐漸遞減，探究其因素，由文獻【4】可知，混凝土火害後再養護，可使試體中水泥再水化，提升試體強度，經由本試驗成果，隨養護時間的增加試體補強後之殘餘強度越低，此結果即可能是因再養護造成裂縫修補，阻礙環氧樹脂灌入內部所致，以上結果可知在火害早期補強效果較佳。

為何在受溫 800°C 時，空氣養護試體強度較滯水養護試體強度多，但是受溫 600°C 時空氣養護試體強度卻較滯水養護試體強度少？探究原因，試體經高溫後表面沉積大量 CaCO₃ 粉末，滯水再養護將試體表面粉末溶解，環氧樹脂補強時容易進入試體內，相較之下，空氣再養護試體表面仍殘留 CaCO₃ 粉末，環氧樹脂補強時不易進入試體內，受溫 800°C 時由於環氧樹脂補強效果有限，所以空氣再養護試體強度與滯水再養護試體強度相差不多，受溫 600°C 時由於環氧樹脂補強效果佳，明顯拉開兩組試體的差距。整體而言空氣再養護試體強度曲線圖較不連貫，是由於試體表面所殘留之 CaCO₃ 粉末經由搬運而掉落，粉末掉落的多寡影響試驗強度所致。

四、計畫結果自評

本試驗試以負壓方式將環氧樹脂灌入火害後混凝土試體，探討不同試體強度、受溫溫度、冷卻方式、再養護方式以及再養護時間等因素，對於補強後殘餘強度影響，經由試驗之後得知結論如下。

1. 環氧樹脂增強效果對於高強度混凝土優於普通混凝土增強效果。
2. 受溫 600°C 混凝土補強效果優於受溫 800°C 混凝土補強效果。
3. 以本試驗中再養護時間皆為 28 天的試體探討，高強度混凝土試體急速冷卻後以環氧樹脂補強提升殘餘強度的效果優於自然冷卻的試體；而普通強度混凝土試體自然冷卻後以環氧樹脂補強提升殘餘強度的效果優於急速冷卻的試體。
4. 自然冷卻試體由於試體表面殘留 CaCO₃ 粉末，以環氧樹脂注入裂縫時受到阻礙，由於試體表面粉末多寡不一致，故試驗結果較不具連貫性。
5. 隨著再養護時間的增加，試體再水化作用使裂縫逐漸修補，以環氧樹脂注入裂縫時受到阻礙，故提升殘餘強度的效果變差，因此，火害之後早期進行補強效果較佳。

根據本研究結論，提供下述幾種建議：

1. 本試驗結果發現火害早期之裂縫補強較具效果，建議往後研究可針對混凝土火害早期裂縫發展與補強效果進行交叉比較，以確認最佳火害補強時間。
2. 本試驗於環氧樹脂補強後一週即進行抗壓試驗，建議往後研究可在補強後測試不同補強後齡期之試體，長期觀測混凝土之強度發展進行比較。
3. 本試驗自然冷卻空氣在養護的試體，由於表面殘留大量 CaCO₃ 粉末，導致試驗結果不連貫，因此建

議往後混凝土試體火害後於進行補強之前，應先設法清除表面之 CaCO_3 粉末，減少試驗變因。

4. 本試驗中並未對高強度混凝土火害早期(7天)進行補強試驗，但由於試驗研究結果得知，混凝土裂縫補強在火害早期進行較具效果，因此建議往後研究可針對火害早期的高強度混凝土進行補強試驗。
5. 建議以本試驗方法配合貼覆補強工法提供混凝土本身強度。
6. 本試驗以負壓 0.5 kgf/cm^2 灌入環氧樹脂，建議可以嘗試以更大的負壓進行試驗，以增強補強效果。
7. 嘗試以不同強度的樹脂進行補強，比對其補強效果。

四、參考文獻

1. R. Rhoades and R. C. Mielenz, Petrography of concrete aggregate, J. Amer. Concr. Inst, 42, pp. 581-600 (June 1946).
2. 林炳炎, “火, 火, 火, 混凝土的耐火性及熱性質”, 營建世界, 1986。
3. Neville, A.M., “Properties of Concrete” fourth edition.
4. 許修豪, 「不同冷卻再養護方式對混凝土承受高溫後殘餘強度及恢復狀況之影響」, 國立交通大學碩士論文, 1999。
5. 王天志, 「加聚丙烯纖維之高性能混凝土在高溫後之強度恢復」, 國立交通大學碩士論文, 1997。
6. 廖侶翔, 「混凝土添加不同熱學性能之材料工程性質探討」, 國立交通大學碩士論文, 2009。
7. Chan, Y. N.; Peng, G. F.; and Anson, M., “Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures,” Cement and Concrete Composites, Vol.21, 1999, pp.23-27.
8. Li, Yihai; Guangdong Electric Design Institution, Civil Department Franssen, Jean-Marc; University of Liege, Department of Structural Engineering, “Residual compressive strength of concrete after fire,” ACI Structural and Materials Journals, 14-Jul 2009, M-20009-005.R1.
9. Husem, M., “The effects of high temperature on compressive and flexural strengths” ,Fire Safety Journal, Vol. 41, No. 2, March 2006, pp.155-163.
10. Chan, Y. N.; Luo, X.; and Sun, W. , “Compressive strength and pore structure of high-performance concrete after exposure to high temperature up to 800°C” , Cement and Concrete Research, 2000, pp 247 – 251.
11. Chan, Y. N.; Peng, G.F.; and Anson, M., “Fire Behavior of High-Performance Concrete Made with Silica Fume at Various Moisture Contents”, ACI Materials Journal, May-June 1999, pp.405-411.
12. Yngve Anderberg, “Spalling Phenomena of HPC and OC”, NIST Workshop on Fire Performance of High Strength Concrete, Feb 13-14, 1997.
13. Fu Yu-fang; Wong Yuk-lung; Poon Chi-sun; and Tang Chun-an, “Literature Review of Study on Mechanism of Explosive Spalling in Concrete at Elevated Temperatures”, Journal of Building Materials, Vol.9, Jun, 2006.
14. 郭詩毅, 「鋼板貼片用環氧樹脂受溫後黏結性質變化之研究」, 國立台灣科技大學博士論文, 2004。



圖 1. 高溫爐

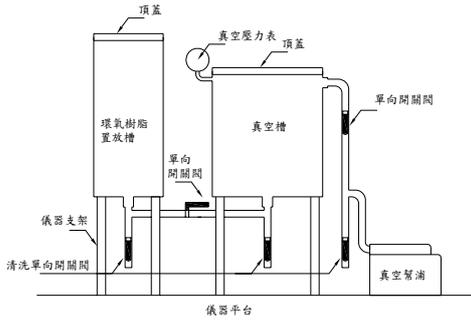


圖 2. 環氧樹脂灌入儀

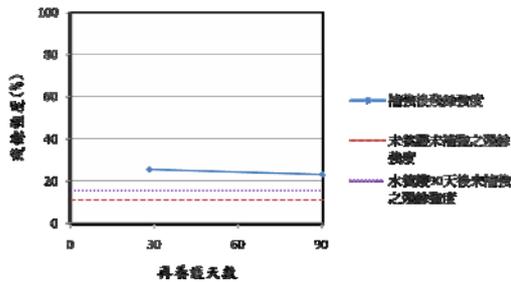


圖 3. 高強度混凝土受800°C後急速冷卻滯水再養護後以環氧樹脂補強之殘餘強度

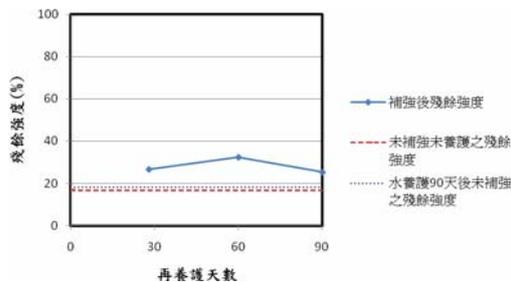


圖 4. 高強度混凝土受800°C後自然冷卻滯水再養護後以環氧樹脂補強之殘餘強度

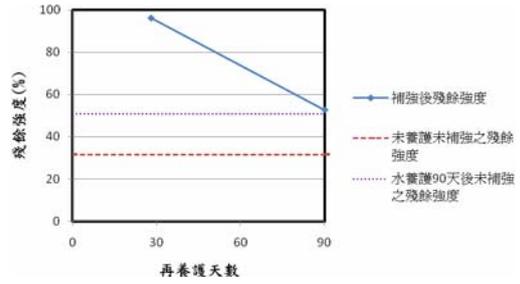


圖 5. 高強度混凝土受600°C後急速冷卻滯水再養護後以環氧樹脂補強之殘餘強度

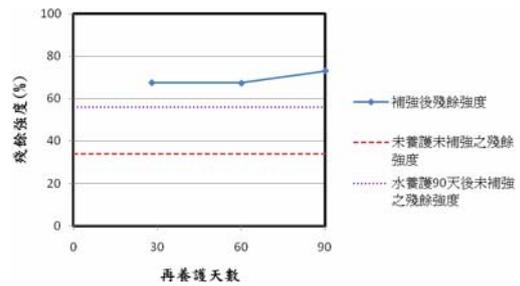


圖 6. 高強度混凝土受600°C後自然冷卻滯水再養護後以環氧樹脂補強之殘餘強度

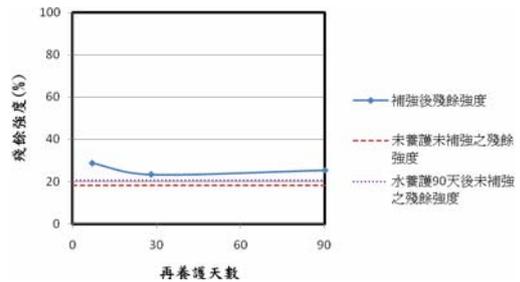


圖 7. 普通強度混凝土受800°C後急速冷卻滯水再養護後以環氧樹脂補強之殘餘強度

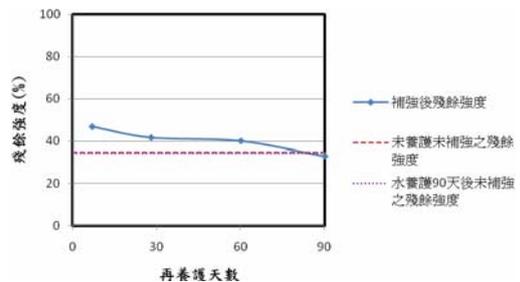


圖 8. 普通強度混凝土受800°C後自然冷卻滯水再養護後以環氧樹脂補強之殘餘強度

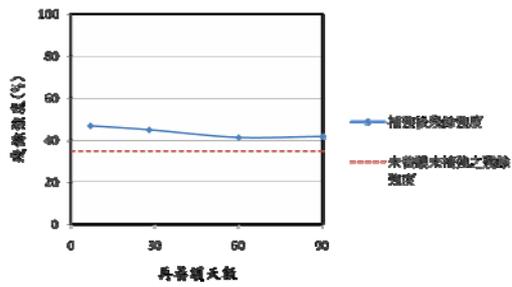


圖 9. 普通強度混凝土受800°C後自然冷卻空氣再養護後以環氧樹脂補強之殘餘強度

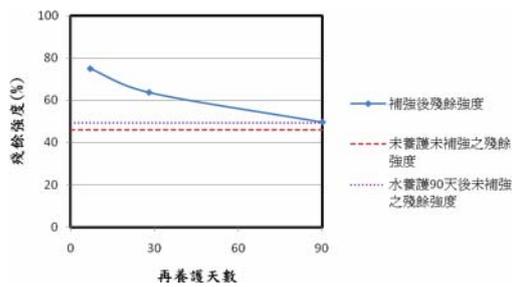


圖 10. 普通強度混凝土受600°C後急速冷卻滯水再養護後以環氧樹脂補強之殘餘強度

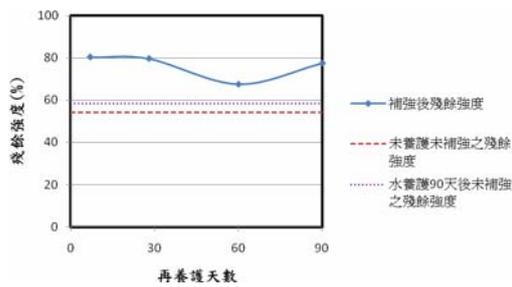


圖 11. 普通強度混凝土受600°C後自然冷卻滯水再養護後以環氧樹脂補強之殘餘強度

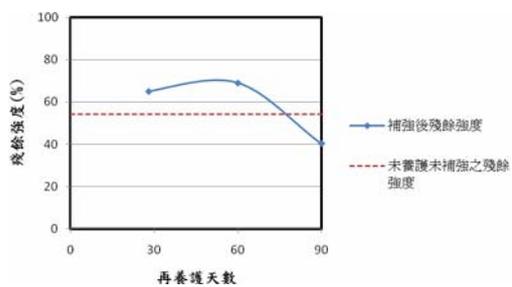


圖 12. 普通強度混凝土受600°C後自然冷卻空氣再養護後以環氧樹脂補強之殘餘強度

無衍生研發成果推廣資料

98 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：鄭復平		計畫編號：98-2221-E-009-165-				計畫名稱：環氧樹脂補強火害後混凝土之參數研究	
成果項目		量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）	
		實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數（含實際已達成數）	本計畫實際貢獻百分比			
國內	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（本國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		
國外	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%		章/本
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（外國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		

<p>其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)</p>	<p>可作為日後建築物受火災損害修復補強之參考。</p>
--	------------------------------

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科 教 處 計 畫 加 填 項 目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與(閱聽)人數	0	

國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表 未發表之文稿 撰寫中 無

專利： 已獲得 申請中 無

技轉： 已技轉 洽談中 無

其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

初步發現有一定成效，如果能夠盡早補強，效果會更好。